

9.3.2 Drag Tekanan

Drag tekanan (bentuk) adalah drag yang dihasilkan oleh tegangan normal

Drag tekanan, \mathcal{F}_p , adalah bagian dari drag yang langsung disebabkan oleh tekanan, p , pada sebuah benda. Drag ini sering disebut sebagai drag bentuk karena ketergantungan yang sangat kuat pada bentuk dari benda. Drag tekanan adalah fungsi dari besarnya tekanan dan orientasi arah elemen permukaan di mana gaya tekanan tersebut bekerja. Sebagai contoh, gaya tekanan pada kedua sisi pelat datar sejajar aliran mungkin saja sangat besar, tetapi gaya tersebut tidak berkontribusi pada drag karena gaya tersebut bekerja pada arah tegak lurus terhadap kecepatan hulu. Sebaliknya, gaya tekanan pada pelat datar yang tegak lurus aliran menyebabkan keseluruhan drag.

Seperti yang telah disinggung sebelumnya, pada sebagian besar benda terdapat bagian pada permukaan yang sejajar dengan aliran hulu, dan yang lainnya tegak lurus terhadap kecepatan hulu, dan sebagian besar lainnya pada orientasi arah dengan sudut di antaranya. Drag tekanan dapat juga diperoleh dari Persamaan 9.1 jika terdapat gambaran terperinci dari distribusi tekanan dan bentuk benda yang diberikan. Artinya,

$$\mathcal{F}_p = \int p \cos \theta \, dA$$

yang dapat dituliskan kembali dalam koefisien drag tekanan, C_{Dp} , sebagai

$$C_{Dp} = \frac{\mathcal{F}_p}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} = \frac{\int p \cos \theta \, dA}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} = \frac{\int C_p \cos \theta \, dA}{A} \quad (9.37)$$

Koefisien tekanan adalah bentuk tak berdimensi dari tekanan.

Di sini $C_p = (p - p_o)/(\rho U^2/2)$ adalah koefisien tekanan, di mana p_o adalah tekanan acuan. Besarnya tekanan acuan tidak mempengaruhi drag secara langsung karena gaya tekanan netto pada benda adalah nol jika tekanan konstan (yaitu p_o) pada seluruh permukaan.

Untuk aliran-aliran yang efek inersianya relatif besar terhadap efek viskos (yaitu aliran dengan bilangan Reynolds besar), perbedaan tekanan, $p - p_o$ berbanding langsung dengan tekanan dinamik, $\rho U^2/2$, dan koefisien tekanan tidak tergantung pada bilangan Reynolds. Dalam situasi tersebut, kita perkirakan bahwa koefisien drag relatif tidak tergantung pada bilangan Reynolds.

Untuk aliran-aliran yang efek viskosnya relatif lebih besar terhadap efek inersia (yaitu aliran dengan bilangan Reynolds kecil), didapati bahwa baik perbedaan tekanan dan tegangan geser dinding berbanding langsung dengan tegangan viskos karakteristik, $\mu U/\ell$, di mana ℓ adalah panjang karakteristik. Dalam situasi seperti itu kita perkirakan koefisien drag sebanding dengan $1/Re$. Artinya $C_D \sim \mathcal{F}/(\rho U^2/2) \sim (\mu U/\ell)/(\rho U^2/2) \sim \mu/\rho U \ell = 1/Re$. Karakteristik ini serupa dengan ketergantungan faktor gesekan $f \sim 1/Re$ untuk aliran pipa laminar dan $f \sim \text{konstan}$ untuk aliran dengan bilangan Reynolds besar (lihat Subbab 8.4)

Jika viskositas nol, drag tekanan pada setiap benda berbentuk apapun (simetris atau tidak) dalam aliran tunak akan bernilai nol. Mungkin akan terdapat gaya tekanan yang besar pada bagian depan benda, tetapi mungkin akan terdapat gaya tekanan yang sama besar (dan arahnya berlawanan) pada bagian belakang. Jika viskositasnya tidak nol, drag tekanan netto mungkin

tidak nol karena separasi lapisan batas seperti yang dibahas pada Subbab 9.2.6. Contoh 9.9 mengilustrasikan hal ini.

CONTOH 9.9

Fluida viskos tak mampu-mampat mengalir melewati sebuah silinder bundar yang ditunjukkan dalam Gambar C9.9a. Koefisien tekanan pada permukaan silinder (yang ditentukan dari pengukuran eksperimen) ditunjukkan dalam Gambar C9.9a. Tentukan koefisien drag tekanan untuk aliran ini. Gabungkan hasil dari Contoh 9.8 dan 9.9 untuk menentukan koefisien drag pada silinder bundar. Bandingkan hasil tersebut dengan yang diberikan oleh Gambar 9.21.

PENYELESAIAN

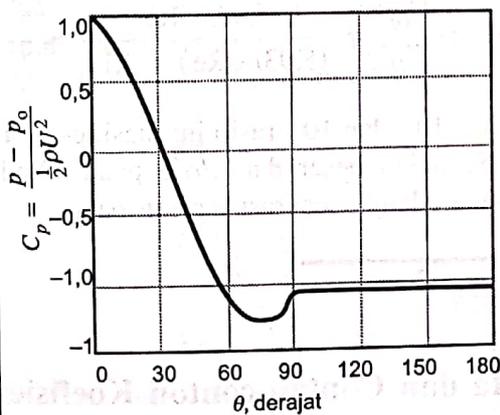
Koefisien drag tekanan (bentuk), C_{Dp} , dapat ditentukan dari Persamaan 9.37 sebagai

$$C_{Dp} = \frac{1}{A} \int C_p \cos \theta \, dA = \frac{1}{bD} \int_0^{2\pi} C_p \cos \theta \, b \left(\frac{D}{2} \right) d\theta$$

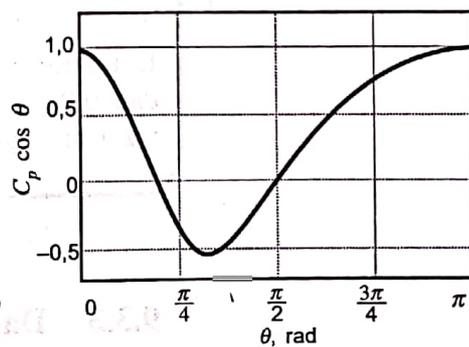
atau karena simetri

$$C_{Dp} = \int_0^{\pi} C_p \cos \theta \, d\theta$$

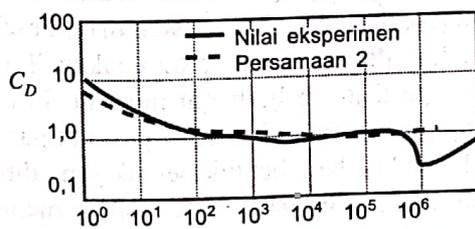
di mana b dan D adalah panjang dan diameter dari silinder. Untuk mendapatkan C_{Dp} , kita harus mengintegrasikan fungsi $C_p \cos \theta$ dari $\theta = 0$ sampai $\theta = \pi$ radian. Sekali lagi, hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan metode pengintegralan numerik atau dengan menentukan luas di bawah kurva yang ditunjukkan dalam Gambar C9.9b. Hasilnya adalah



(a)



(b)



$$Re = \frac{UD}{\nu}$$

(c)

■ GAMBAR C9.9

$$C_{Dp} = 1,17$$

(1) (Jawaban)

Perhatikan bahwa tekanan positif di bagian depan dari silinder ($0 \leq \theta \leq 30^\circ$) dan tekanan negatif (kurang dari nilai hulunya) di bagian belakang ($90 \leq \theta \leq 180^\circ$) menghasilkan kontribusi positif pada *drag*. Tekanan negatif pada bagian depan silinder ($30 < \theta < 90^\circ$) mengurangi *drag* dengan negatif pada silinder ke arah hulu. Luas positif di bawah kurva $C_p \cos \theta$ lebih besar daripada luas negatif—terdapat *drag* tekanan netto. Jika tidak ada viskositas, kedua kontribusi ini akan sama besar—sehingga tidak akan terdapat *drag* tekanan (atau gesekan)

Drag netto pada silinder adalah jumlah dari *drag* gesekan dan tekanan. Jadi dari Persamaan 1, pada Contoh 9.8, dan Persamaan 1 pada contoh ini, kita mendapatkan koefisien *drag*

$$C_D = C_{Df} + C_{Dp} = \frac{5,93}{\sqrt{Re}} + 1,17 \quad (2) \text{ (Jawaban)}$$

Hasil ini dibandingkan dengan nilai eksperimental standar (yang diperoleh dari Gambar 9.21) di dalam Gambar C9.9c. Kesesuaiannya sangat baik untuk kisaran bilangan Reynolds yang cukup luas. Untuk $Re < 10$, kurva-kurva divergen karena aliran bukan lagi aliran jenis lapisan batas—tegangan geser dan distribusi tekanan yang digunakan untuk mendapatkan Persamaan 2 tidak berlaku di dalam kisaran ini. Divergensi yang drastis pada kurva-kurva untuk $Re > 3 \times 10^5$ disebabkan oleh perubahan dari lapisan batas laminar menjadi turbulen, dengan perubahan distribusi tekanan yang berkaitan. Hal ini dibahas dalam Subbab 9.3.3.

Menarik untuk membandingkan *drag* gesekan dengan *drag* total pada silinder. Artinya,

$$\frac{C_{Df}}{C_D} = \frac{C_{Df}}{C_D} = \frac{5,93/\sqrt{Re}}{(5,93/\sqrt{Re}) + 1,17} = \frac{1}{1 + 0,197 \sqrt{Re}}$$

Untuk $Re = 10^3$, 10^4 , dan 10^5 , rasio ini masing-masing adalah 0,138, 0,0483 dan 0,0158. Sebagian besar dari *drag* pada silinder tumpul adalah *drag* tekanan—karena adanya separasi lapisan batas.

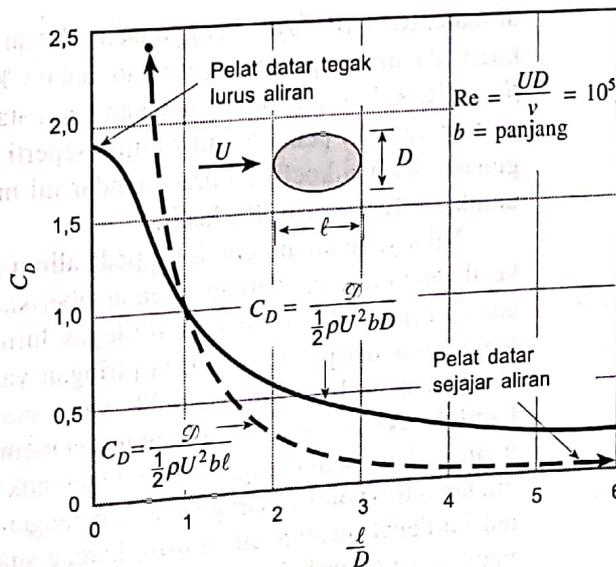
9.3.3 Data dan Contoh-contoh Koefisien Drag

Seperti yang telah dibahas dalam subbab sebelumnya, *drag* netto dihasilkan oleh efek tekanan dan tegangan geser. Dalam banyak hal, kedua efek ini ditinjau bersamaan, dan sebuah koefisien *drag* keseluruhan, C_D seperti yang didefinisikan dalam Persamaan 9.36 digunakan. Terdapat banyak sekali data koefisien *drag* seperti itu di berbagai literatur. Informasi ini meliputi aliran viskos tak mampu-mampat dan mampu-mampat yang melewati hampir berbagai bentuk benda—baik bentuk-bentuk yang dibuat manusia atau bentuk-bentuk alamiah. Dalam Subbab ini, kita akan meninjau sebagian kecil dari informasi ini untuk situasi-situasi yang mewakili. Data tambahan dapat diperoleh dari berbagai sumber (Ref. 5,6)

Ketergantungan Bentuk. Jelas bahwa koefisien *drag* untuk berbagai benda tergantung pada bentuk dari benda tersebut, dengan bentuk yang berkisar mulai dari benda yang *streamlined* sampai benda yang tumpul. *Drag* pada elips dengan aspek rasio l/D , di mana D dan l adalah ketebalan dan panjang yang sejajar dengan aliran, mengilustrasikan ketergantungan ini. Koefisien *drag* $C_D = \mathcal{D} / (\rho U^2 b D / 2)$, berdasarkan luas frontal, $A = b D$, di mana b adalah panjang normal terhadap aliran seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 9.19. Semakin tumpul benda, semakin besar koefisien drag. Dengan $l/D = 0$ (yaitu sebuah pelat datar tegak lurus terhadap aliran) kita memperoleh nilai C_D untuk pelat datar = 1,9. Dengan $l/D = 1$, nilai yang berkaitan untuk sebuah silinder bundar diperoleh. Dengan semakin membesarnya l/D , nilai dari C_D semakin berkurang.

Untuk aspek rasio yang sangat besar ($l/D \rightarrow \infty$) elips berperilaku seperti sebuah pelat datar yang sejajar terhadap aliran. Untuk kasus seperti itu, *drag* gesekan lebih besar daripada *drag* tekanan, dan nilai C_D berdasarkan luas frontal $A = b D$ akan meningkat dengan meningkatnya l/D . (Hal ini terjadi untuk nilai l/D yang lebih besar dibandingkan dengan yang ditunjukkan dalam gambar.) Untuk benda yang sangat tipis itu (yaitu elips dengan $l/D \rightarrow \infty$, sebuah pelat datar atau airfoil yang sangat tipis) biasanya menggunakan luas *planform*, $A = b l$ dalam mendefinisikan koefisien drag. Tambahan pula, luasan di mana tegangan geser bekerja adalah luas *planform*, dan bukannya luas frontal yang jauh lebih kecil (untuk benda tipis). Koefisien *drag* elips berdasarkan luas *planform*, $C_D = \mathcal{D} / (\rho U^2 b l / 2)$, juga ditunjukkan dalam Gambar 9.19. Jelaslah *drag* yang diperoleh dengan menggunakan koefisien-koefisien drag yang manapun, hasilnya akan sama. Hal tersebut semata-mata hanya mewakili dua cara berbeda untuk menyatakan informasi yang sama.

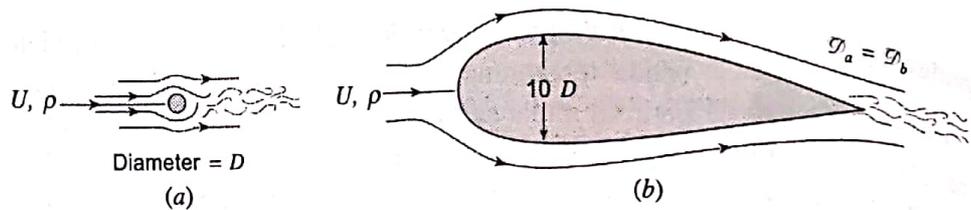
Banyaknya bagian yang dibuat *streamline* dapat memberikan pengaruh yang besar terhadap *drag*. Sulit dipercaya bahwa *drag* pada kedua benda dua-dimensi yang digambar dalam Gambar 9.20 sama. Lebar dari olakan untuk *strut streamlined* sangat tipis, dalam orde yang sama seperti yang dihasilkan oleh silinder bundar yang berdiameter jauh lebih kecil.



■ GAMBAR 9.19 Koefisien drag untuk elips dengan luas karakteristik berupa luas frontal, $A = b D$ atau luas planform, $A = b l$ (Ref.5)

19.5 Latihan terjun payung

Koefisien drag dapat berdasarkan luas frontal atau luas planform.



■ GAMBAR 9.20 Dua benda yang ukurannya sangat jauh berbeda namun memiliki gaya drag yang sama: (a) silinder bundar $C_D = 1,2$; (b) strut stream-lined, $C_D = 0,12$.

Ketergantungan Bilangan Reynolds. Parameter lain yang dapat membuat koefisien drag sangat tergantung padanya adalah bilangan Reynolds. Kategori utama dari ketergantungan bilangan Reynolds adalah (1) aliran dengan bilangan Reynolds sangat kecil, (2) aliran dengan bilangan Reynolds sedang (lapisan batas laminar), dan (3) aliran dengan bilangan Reynolds sangat besar (lapisan batas turbulen). Contoh-contoh mengenai ketiga situasi ini dibahas di bawah ini.

Aliran dengan bilangan Reynolds rendah ($Re < 1$) diatur oleh suatu kesetimbangan antara gaya-gaya viskos dan gaya tekanan. Efek-efek inersia sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Dalam hal demikian, drag diperkirakan adalah sebuah fungsi dari kecepatan hulu, U , ukuran benda, ℓ , dan viskositas, μ . Artinya,

$$\mathcal{D} = f(U, \ell, \mu)$$

Dari pertimbangan dimensional (lihat Subbab 7.7.1)

$$\mathcal{D} = C\mu \ell U \tag{9.38}$$

di mana nilai dari konstanta C tergantung pada bentuk dari benda. Jika kita menempatkan Persamaan 9.38 ke dalam bentuk tak berdimensi menggunakan definisi standar dari koefisien drag, kita mendapatkan

$$C_D = \frac{\mathcal{D}}{\frac{1}{2}\rho U^2 \ell^2} = \frac{2C\mu \ell U}{\rho U^2 \ell^2} = \frac{2C}{Re}$$

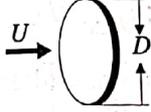
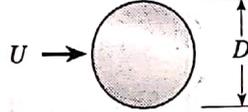
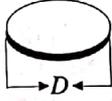
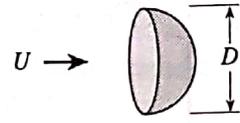
di mana $Re = \rho U \ell / \mu$. Penggunaan tekanan dinamik, $\rho U^2 / 2$, dalam definisi koefisien drag agak menyesatkan dalam kasus aliran menjalar (*creeping flow*) ($Re < 1$) karena menggunakan kerapatan fluida, yang bukan merupakan suatu parameter penting untuk aliran seperti itu (inersia tidak penting). Penggunaan definisi koefisien drag standar ini memberikan ketergantungan $1/Re$ untuk koefisien drag Re kecil.

Nilai yang umum untuk C_D pada aliran-aliran dengan bilangan Reynolds kecil yang melewati berbagai benda diberikan dalam Tabel 9.4. Yang menarik adalah drag pada piringan (*disk*) tegak lurus terhadap aliran hanya 1,5 kali lebih besar daripada drag pada piringan yang sejajar dengan aliran. Untuk aliran dengan bilangan Reynolds yang besar, rasio ini sangat besar (lihat **Contoh 9.1**). *Streamlining* (yaitu usaha membuat benda lebih ramping) dapat memberikan pengurangan drag yang cukup banyak pada aliran dengan bilangan Reynolds besar; pada aliran dengan bilangan Reynolds sangat kecil, hal ini dapat meningkatkan drag karena suatu peningkatan dalam luasan di mana gaya geser bekerja. Untuk kebanyakan benda, hasil-hasil untuk aliran dengan bilangan Reynolds kecil berlaku sampai dengan bilangan Reynolds sekitar 1.

Untuk aliran dengan bilangan Reynolds sangat kecil, inersia dapat diabaikan.

Untuk aliran-aliran dengan bilangan Reynolds sangat kecil, koefisien drag bervariasi secara terbalik dengan bilangan Reynolds.

■ TABEL 9.4 Koefisien Drag untuk Bilangan Reynolds kecil (Ref.7) ($Re = \rho UD/\mu, A = \pi D^2/4$)

| Objek | $C_D = \mathcal{D}/(\rho U^2 A/2)$ (untuk $Re \lesssim 1$) | Objek | C_D |
|---|--|--|---------|
| a. Piringan bundar tegak lurus | 20,4/Re | a. Bola | 24,0/Re |
|  | |  | |
| b. Piringan bundar sejajar aliran | 13,6/Re | b. Setengah bola | 22,2/Re |
|  | |  | |

CONTOH 9.10

Sebuah butiran kecil pasir berdiameter $D = 0,10$ mm dan gravitasi spesifik $SG = 2,3$, menempati dasar sebuah danau setelah dijatuhkan dari perahu yang lewat. Tentukan berapa cepat butiran pasir itu jatuh melalui air yang diam

PENYELESAIAN

Diagram benda bebas dari partikel (relatif terhadap partikel yang bergerak) ditunjukkan di dalam Gambar C9.10. Partikel tersebut bergerak ke bawah dengan kecepatan konstan U yang diatur oleh suatu kesetimbangan antara berat partikel, \mathcal{W} , dengan gaya apung dari air di sekelilingnya, F_B dan drag dari air pada partikel, \mathcal{D} .

Dari diagram benda bebas, kita memperoleh

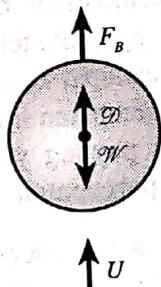
$$\mathcal{W} = \mathcal{D} + F_B$$

di mana

$$\mathcal{W} = \gamma_{\text{pasir}} V = SG \gamma_{\text{H}_2\text{O}} \frac{\pi}{6} D^3 \tag{1}$$

dan

$$F_B = \gamma_{\text{H}_2\text{O}} V = \gamma_{\text{H}_2\text{O}} \frac{\pi}{6} D^3 \tag{2}$$



■ GAMBAR C9.10

Kita mengasumsikan (karena kecilnya benda) bahwa aliran akan berupa aliran menjaral ($Re < 1$) dengan $C_D = 24/Re$ (lihat Tabel 9.4) sehingga

$$\mathcal{D} = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} U^2 \frac{\pi}{4} D^2 C_D = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} U^2 \frac{\pi}{4} D^2 \left(\frac{24}{\rho_{H_2O} U D / \mu_{H_2O}} \right)$$

atau

$$\mathcal{D} = 3\pi\mu_{H_2O}UD \quad (3)$$

Akhirnya kita harus mengecek untuk menentukan apakah asumsi ini berlaku atau tidak. Persamaan 3 disebut sebagai hukum Stokes, untuk menghormati G.G Stokes (1819–1903), seorang ahli matematika dan fisika Inggris. Dengan menggabungkan Persamaan 1,2 dan 3, kita memperoleh

$$SG \gamma_{H_2O} \frac{\pi}{6} D^3 = 3\pi\mu_{H_2O}UD + \gamma_{H_2O} \frac{\pi}{6} D^3$$

atau, karena $\gamma = \rho g$,

$$U = \frac{(SG\rho_{H_2O} - \rho_{H_2O})gD^2}{18\mu} \quad (4)$$

Dari Tabel 1.6 untuk air pada $15,6^\circ\text{C}$, kita mendapatkan $\rho_{H_2O} = 999 \text{ kg/m}^3$ dan $\mu_{H_2O} = 1,12 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$. Jadi dari Persamaan 4 kita mendapatkan

$$U = \frac{(2,3 - 1)(999 \text{ kg/m}^3)(9,81 \text{ m/s}^2)(0,10 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{18(1,12 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2)}$$

atau

$$U = 6,32 \times 10^{-3} \text{ m/s} \quad (\text{Jawaban})$$

Karena

$$Re = \frac{\rho DU}{\mu} = \frac{(999 \text{ kg/m}^3)(0,10 \times 10^{-3} \text{ m})(0,00632 \text{ m/s})}{1,12 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2} = 0,564$$

kita lihat bahwa $Re < 1$, dan bentuk dari koefisien *drag* yang digunakan adalah valid.

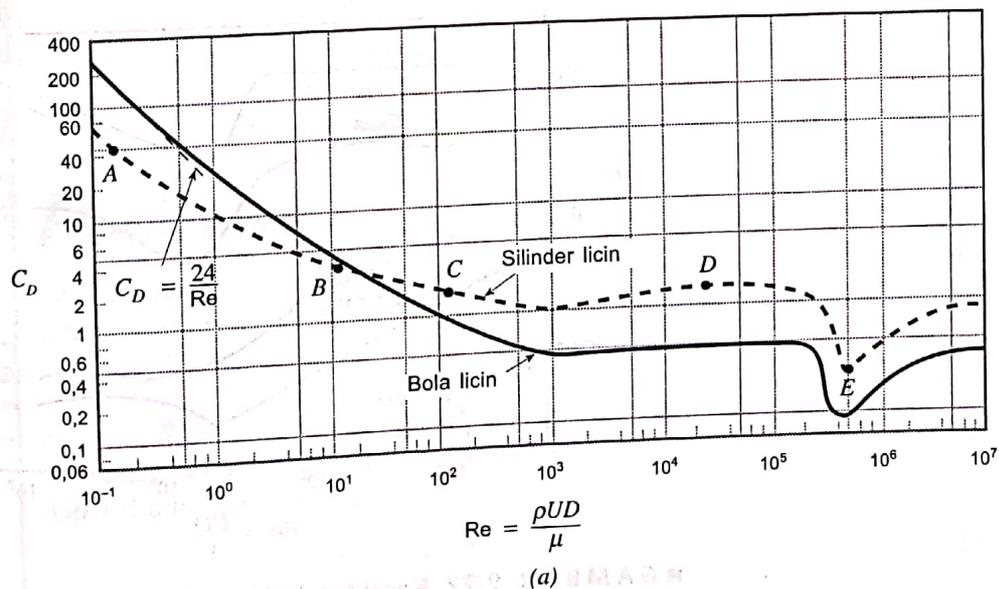
Perhatikan bahwa jika kerapatan dari partikel sama dengan fluida di sekelilingnya, dari Persamaan 4, kita akan mendapatkan $U = 0$. Hal ini cukup beralasan karena partikel tersebut akan terapung secara netral dan tidak akan ada gaya untuk mengatasi *drag* yang terjadi akibat gerakan. Juga perhatikan bahwa kita telah mengasumsikan bahwa partikel jatuh pada kecepatan terminalnya yang tunak. Artinya, kita telah mengabaikan percepatan partikel dari keadaan diam sampai mencapai kecepatan terminalnya. Karena kecepatan terminalnya kecil, waktu percepatan ini sangat kecil. Untuk benda yang lebih cepat (misalnya penerjun payung yang jatuh bebas), mungkin penting untuk mempertimbangkan percepatan dari saat jatuhnya benda tersebut.

Aliran dengan bilangan Reynolds sedang cenderung untuk memiliki struktur aliran lapisan batas. Untuk aliran seperti itu yang melewati benda-benda *streamlined*, koefisien *drag* cenderung untuk sedikit berkurang dengan meningkatnya bilangan Reynolds. Ketergantungan $C_D \sim Re^{-1/2}$ untuk lapisan batas laminar pada pelat datar (lihat Tabel 9.3) adalah salah satu contohnya. Aliran dengan bilangan Reynolds sedang dan melewati benda-benda tumpul pada umumnya menghasilkan koefisien *drag* yang relatif konstan. Nilai C_D untuk bola dan silinder bundar yang ditunjukkan dalam Gambar 9.21a menunjukkan karakter ini dalam kisaran $10^3 < Re < 10^5$.

Struktur dari medan aliran pada beberapa bilangan Reynolds ditunjukkan dalam Gambar 9.21a ditunjukkan dalam Gambar 9.21b. Untuk benda yang ditentukan terdapat berbagai variasi dari situasi aliran, tergantung pada bilangan Reynolds yang terlibat. Pembaca yang ingin mengetahui lebih banyak lagi, sangat dianjurkan untuk mempelajari foto-foto dan video yang menarik dari situasi aliran ini (atau yang lainnya), yang dapat dijumpai pada Ref. 8 dan 31. (Lihat juga foto pada awal Bab 7).

Untuk banyak bentuk, terdapat perubahan mendadak dari karakter koefisien *drag* apabila lapisan batasnya menjadi turbulen. Hal ini diilustrasikan dalam Gambar 9.15 untuk pelat datar dan dalam Gambar 9.21 untuk bola dan silinder bundar. Bilangan Reynolds di mana transisi ini berlangsung adalah fungsi dari bentuk benda.

Untuk benda-benda *streamlined*, koefisien *drag* meningkat apabila lapisan batas menjadi turbulen karena sebagian besar *drag* disebabkan oleh gaya geser, yang lebih besar untuk aliran turbulen daripada aliran laminar. Sebaliknya, koefisien *drag* pada benda yang relatif tumpul, seperti bola atau silinder bundar, pada kenyataannya berkurang apabila lapisan batas menjadi turbulen. Seperti yang dibahas dalam Subbab 9.2.6, lapisan batas turbulen dapat bergerak jauh sepanjang permukaan sampai gradien tekanan balik di bagian belakang silinder sebelum terjadinya separasi. Hasilnya adalah olakan yang lebih tipis dan *drag* tekanan yang lebih kecil untuk aliran lapisan batas

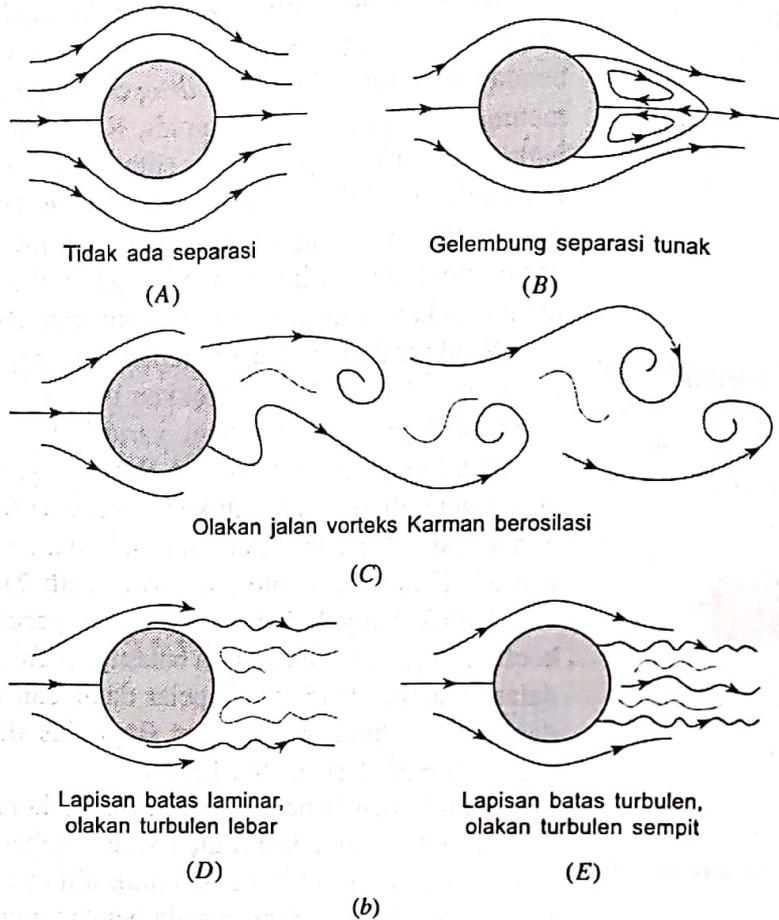


■ GAMBAR 9.21 (a) Koefisien drag sebagai fungsi dari bilangan Reynolds untuk silinder bundar licin dan bola licin

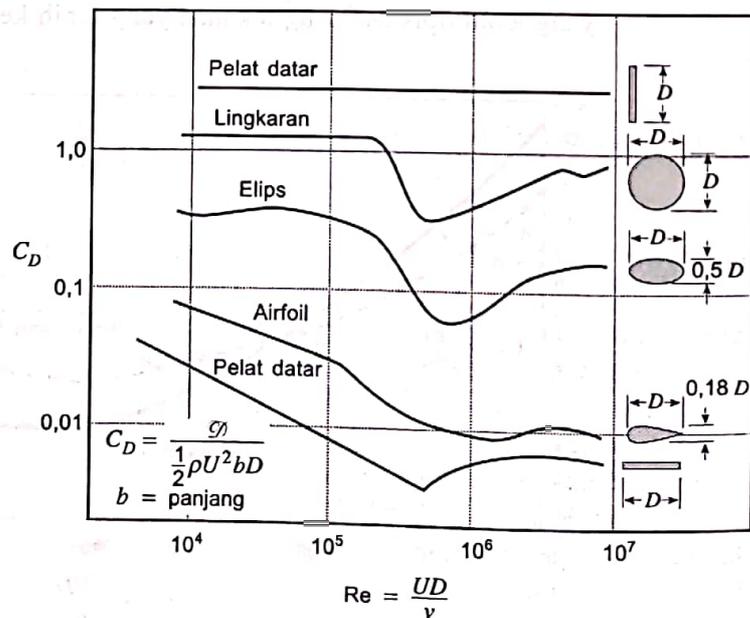
Aliran melewati sebuah silinder dapat memiliki berbagai struktur yang berbeda.



V9.6 Sinyal beresilasi



■ G A M B A R 9.21 (b) Pola aliran yang khas dari aliran yang melewati sebuah silinder bundar pada berbagai bilangan Reynolds seperti yang ditunjukkan pada (a).



■ G A M B A R 9.22 Karakter dari koefisien drag sebagai fungsi dari bilangan Reynolds untuk benda-benda dengan berbagai tingkat streamlining, dari sebuah pelat datar tegak lurus terhadap aliran hulu sampai pelat datar sejajar dengan aliran (aliran dua dimensi) (Ref. 5).

Koefisien drag dapat menjadi sangat berubah apabila lapisan batas menjadi turbulen.

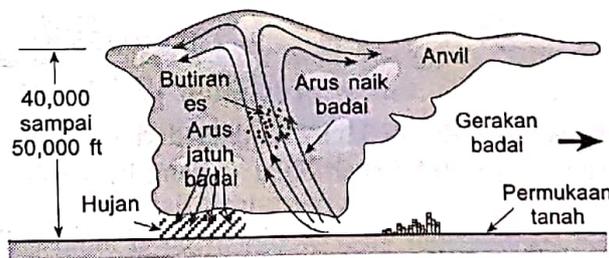
turbulen. Hal ini ditunjukkan dalam Gambar 9.21 dengan penurunan mendadak dari C_D untuk $10^5 < Re < 10^6$. Dalam kisaran ini, *drag* aktual (bukan hanya koefisien *drag*) berkurang seiring dengan meningkatnya kecepatan. Akan sangat sulit sekali untuk mengendalikan aliran yang tunak dari benda seperti itu dalam kisaran ini –peningkatan kecepatan memerlukan penurunan *thrust* (*drag*). Dalam kisaran bilangan Reynolds lainnya, *drag* meningkat dengan meningkatnya kecepatan hulu (meskipun C_D mungkin berkurang dengan Re)

Untuk benda yang sangat tumpul, seperti sebuah pelat datar yang tegak lurus aliran, separasi aliran terjadi pada tepian dari pelat bagaimanapun sifat aliran lapisan batasnya. Jadi, koefisien *drag* menunjukkan ketergantungan yang lemah pada bilangan Reynolds.

Koefisien *drag* untuk serangkaian benda dua-dimensi dengan ketumpulan yang bervariasi diberikan sebagai fungsi bilangan Reynolds dalam Gambar 9.22. Karakteristik yang digambarkan di atas adalah buktinya.

CONTOH 9.11

Butiran batu es dihasilkan dari partikel es yang naik dan turun berulang-ulang pada arus naik dari sebuah badai seperti ditunjukkan pada Gambar C9.11. Ketika butiran batu es cukup besar, *drag* aerodinamika dari arus naik badai tidak dapat lagi mengatasi berat dari butiran batu es tersebut, dan butiran itu akan jatuh dari awan badai. Perkirakan kecepatan U dari arus naik badai yang diperlukan untuk membuat butiran batu es berdiameter $D = 1,5$ in. (Seukuran bola golf).



■ GAMBAR C9.11

PENYELESAIAN

Seperti dibahas dalam Contoh 9.10, untuk kondisi tunak, sebuah keseimbangan gaya pada benda yang jatuh melalui fluida diberikan oleh

$$\mathcal{W} = \mathcal{D} + F_B$$

di mana $F_B = \gamma_{\text{udara}} \mathcal{V}$ adalah gaya apung dari udara pada partikel, $\mathcal{W} = \gamma_{\text{es}} \mathcal{V}$ adalah berat partikel dan \mathcal{D} adalah *drag* aerodinamika. Persamaan ini dapat ditulis ulang sebagai

$$\frac{1}{2} \rho_{\text{udara}} U^2 \frac{\pi}{4} D^2 C_D = \mathcal{W} - F_B \tag{1}$$

dengan $\mathcal{V} = \pi D^3/6$ dan karena $\gamma_{\text{es}} \gg \gamma_{\text{udara}}$ (artinya $W \gg F_B$), Persamaan 1 dapat disederhanakan menjadi

$$U = \left(\frac{4}{3} \frac{\rho_{es} g D}{\rho_{udara} C_D} \right)^{1/2} \quad (2)$$

Dengan menggunakan $\rho_{es} = 1,84 \text{ slugs/ft}^3$, $\rho_{udara} = 2,38 \times 10^{-3} \text{ slugs/ft}^3$, dan $D = 1,5 \text{ in.} = 0,125 \text{ ft}$, Persamaan 2 menjadi

$$U = \left(\frac{4(1,84 \text{ slugs/ft}^3)(32,2 \text{ ft/s}^2)(0,125 \text{ ft})}{3(2,38 \times 10^{-3} \text{ slugs/ft}^3)C_D} \right)^{1/2}$$

atau

$$U = \frac{64,5}{\sqrt{C_D}} \quad (3)$$

di mana U dalam ft/s. Untuk menentukan U , kita harus mengetahui C_D . Sayangnya, C_D adalah sebuah fungsi dari bilangan Reynolds (lihat Gambar 9.21), yang tidak diketahui kecuali jika U diketahui. Jadi kita harus menggunakan teknik iteratif yang serupa dengan yang telah dilakukan sewaktu menggunakan diagram Moody untuk suatu jenis persoalan aliran pipa tertentu (lihat Subbab 8.5)

Dari Gambar 9.21, kita memperkirakan bahwa C_D dalam kisaran 0,5. Jadi kita asumsikan dulu $C_D = 0,5$ dan dari Persamaan 3, kita peroleh

$$U = \frac{64,5}{\sqrt{0,5}} = 91,2 \text{ ft/s}$$

Bilangan Reynolds yang berkaitan (dengan mengasumsikan $\nu = 1,57 \times 10^{-4} \text{ ft}^2/\text{s}$) adalah

$$\text{Re} = \frac{UD}{\nu} = \frac{91,2 \text{ ft/s} (0,125 \text{ ft})}{1,57 \times 10^{-4} \text{ ft}^2/\text{s}} = 7,26 \times 10^4$$

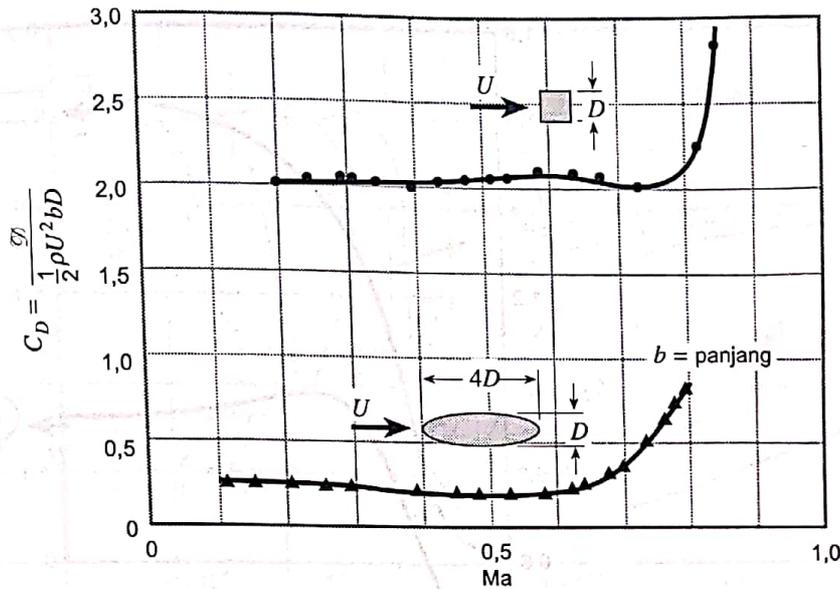
Untuk nilai Re ini kita dapatkan dari Gambar 9.21, $C_D = 0,5$. Jadi nilai asumsi $C_D = 0,5$ benar. Nilai U yang bersesuaian adalah

$$U = 91,2 \text{ ft/s} = 62,2 \text{ mph} \quad (\text{Jawaban})$$

Hasil ini diperoleh dengan menggunakan sifat-sifat udara standar pada permukaan laut. Jika kondisi pada ketinggian 20000 ft yang digunakan (dari Tabel C.1 $\rho_{udara} = 1,267 \times 10^{-3} \text{ slugs/ft}^3$ dan $\mu = 3,324 \times 10^{-7} \text{ lb} \cdot \text{s/ft}^2$) hasil yang berkaitan adalah $U = 125 \text{ ft/s} = 85,2 \text{ mph}$.

Jelas bahwa sebuah pesawat terbang yang melintasi arus naik seperti itu akan merasakan efeknya (walaupun misalnya pesawat itu mampu mengatasi butiran batu es). Sebagaimana terlihat dari Persamaan 2, semakin besar butiran batu es, semakin kuat arus naik. Butiran batu es berdiameter sampai lebih besar dari 6 in. sudah pernah dilaporkan terjadi. Dalam kenyataannya butiran batu es jarang berbentuk bola dan seringkali tidak mulus. Namun demikian perhitungan kecepatan arus naik bersesuaian dengan nilai yang diukur.

Efek Kemampu-mampatan. Diskusi di atas terbatas untuk aliran-aliran tak mampu-mampat. Jika kecepatan dari benda cukup besar, efek kemampu-mampatan menjadi penting dan koefisien *drag* menjadi fungsi dari bilangan Mach, $\text{Ma} = U/c$, di mana c adalah kecepatan suara di dalam fluida. Adanya



■ G A M B A R 9.23 Koefisien drag sebagai fungsi dari bilangan Mach untuk benda dua dimensi dalam aliran subsonik (Ref 5).

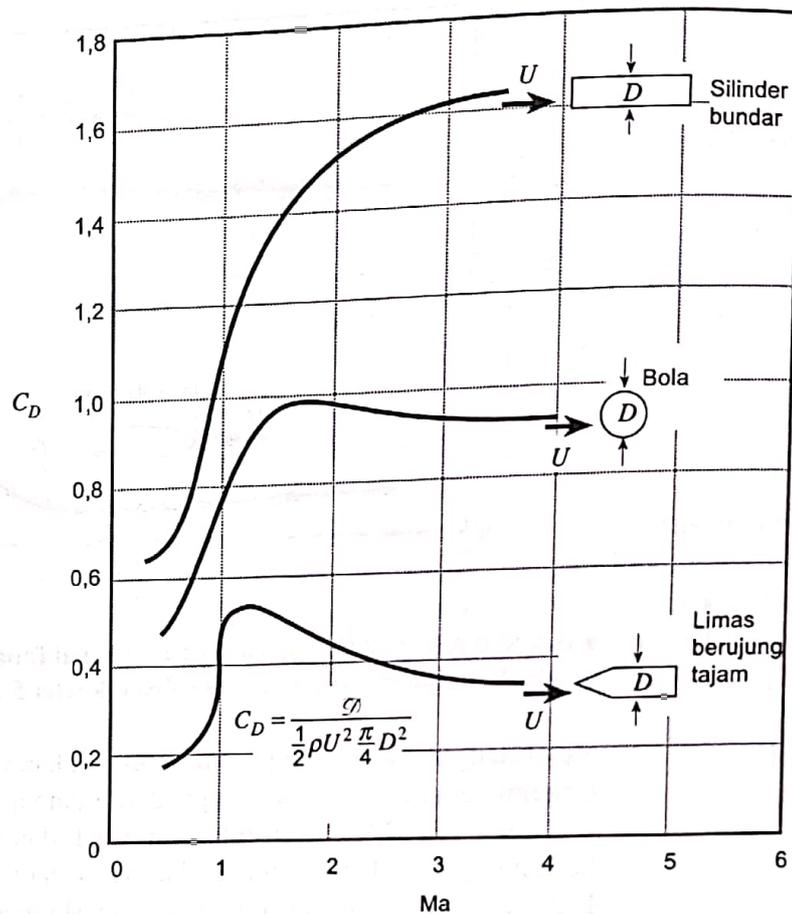
efek bilangan Mach memperumit masalah karena koefisien *drag* untuk benda tertentu kemudian menjadi fungsi dari bilangan Reynolds dan bilangan Mach — $C_D = \phi (Re, Ma)$. Efek bilangan Mach dan bilangan Reynolds seringkali berhubungan dekat karena keduanya secara langsung sebanding dengan kecepatan hulu. Sebagai contoh, Re dan Ma meningkat dengan meningkatnya kecepatan terbang sebuah pesawat terbang. Perubahan dari C_D karena perubahan U disebabkan oleh perubahan dari Re dan Ma .

Ketergantungan yang lebih tepat dari koefisien *drag* terhadap Re dan Ma secara umum agak rumit (Ref. 13). Namun demikian, penyederhanaan berikut sering dibenarkan. Untuk aliran dengan bilangan Mach rendah, koefisien *drag* pada dasarnya tidak tergantung pada Ma seperti ditunjukkan dalam Gambar 9.23. Untuk situasi ini, jika $Ma < 0,5$, efek kompresibilitas tidak penting. Sebaliknya, untuk aliran dengan bilangan Mach yang lebih besar, koefisien *drag* dapat sangat tergantung pada Ma , dengan efek bilangan Reynolds hanya menjadi sekunder.

Untuk kebanyakan benda, nilai dari C_D meningkat secara dramatis di sekitar $Ma = 1$ (aliran sonik). Perubahan karakter ini, ditunjukkan oleh Gambar 9.24, disebabkan oleh adanya gelombang-gelombang kejut (suatu daerah yang sangat sempit di dalam medan aliran di mana parameter aliran yang melintasinya berubah hampir secara diskontinu), yang akan dibahas di Bab 11. Gelombang kejut, yang tidak dapat muncul dalam aliran subsonik, memberikan mekanisme pembentukan *drag* yang tidak ada dalam aliran subsonik yang relatif berkecepatan rendah. (lihat foto pada permulaan Bab 11)

Karakter koefisien *drag* sebagai fungsi dari bilangan Mach berbeda pada benda-benda tumpul dibandingkan benda-benda lancip. Seperti ditunjukkan dalam Gambar 9.24, benda-benda yang lancip menghasilkan koefisien *drag* maksimumnya di sekitar daerah $Ma = 1$ (aliran sonik), sementara koefisien *drag* untuk benda tumpul meningkat dengan Ma jauh di atas $Ma = 1$. Perilaku ini disebabkan oleh sifat dari struktur gelombang kejut dan separasi aliran yang menyertainya. Ujung depan dari sayap pesawat dan separasi aliran yang menyertainya. Ujung depan dari sayap pesawat udara subsonik seringkali dibulatkan dan tumpul, sementara pesawat super-

Koefisien drag biasanya tidak tergantung pada bilangan Mach untuk bilangan Mach sampai kira-kira 0,5.



■ GAMBAR 9.24 Koefisien drag sebagai fungsi dari bilangan Mach untuk aliran supersonik (Adaptasi dari Ref. 19).

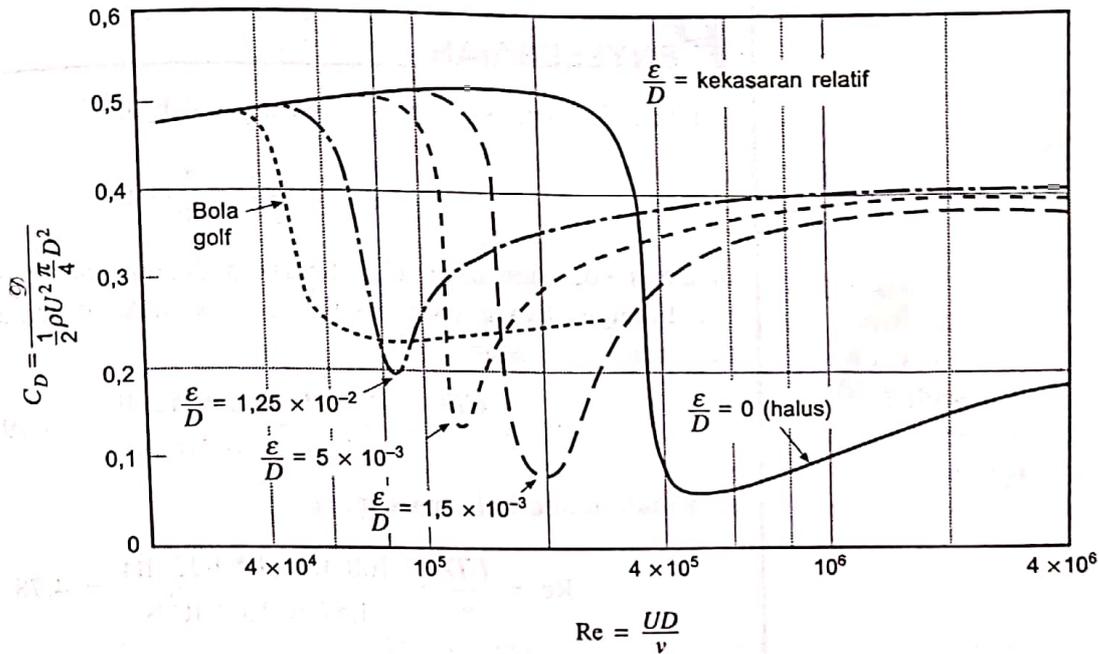
Efek kemampuan-pampatan dapat secara signifikan meningkatkan koefisien drag.

Tergantung pada bentuk benda, peningkatan kekasaran permukaan dapat meningkatkan atau menurunkan drag.

sonik cenderung dibuat lancip. Informasi lebih lanjut lagi mengenai topik penting ini dapat dijumpai pada buku teks standar mengenai aliran mampat dan aerodinamika (Referensi 9, 10, 29).

Kekasaran Permukaan. Seperti ditunjukkan dalam Gambar 9.15, drag pada sebuah pelat datar sejajar dengan aliran sangat tergantung pada kekasaran permukaan, jika aliran lapisannya turbulen. Dalam kasus seperti itu, kekasaran permukaan menembus ke dalam sublapisan laminar yang bersebelahan dengan permukaan (lihat Subbab 8.4) dan mengubah tegangan geser dinding. Di samping peningkatan tegangan geser turbulen, kekasaran permukaan dapat mengubah bilangan Reynolds ketika aliran lapisan batas menjadi turbulen. Jadi, pelat datar yang kasar mungkin mempunyai bagian yang lebih besar dari panjangnya yang diliputi oleh lapisan batas turbulen daripada yang terdapat pada pelat yang licin. Hal ini juga menyebabkan meningkatnya drag netto pada pelat.

Secara umum untuk benda-benda *streamlined*, drag meningkat dengan meningkatnya kekasaran permukaan. Kita harus sangat cermat dalam merancang permukaan sayap pesawat terbang supaya selicin mungkin, karena paku-paku keling atau kepala mur yang menonjol dapat menyebabkan peningkatan drag cukup besar. Sebaliknya, untuk benda yang sangat tumpul, seperti pelat datar tegak lurus aliran, drag tidak tergantung pada kekasaran permukaan, karena tegangan geser tidak pada arah aliran hulu dan tidak berkontribusi apapun pada drag.



■ GAMBAR 9.25 Efek dari kekasaran permukaan pada koefisien drag pada sebuah bola dalam kisaran bilangan Reynolds di mana lapisan batas laminar menjadi turbulen (Ref. 5).

Untuk benda-benda tumpul seperti silinder bundar atau bola, peningkatan kekasaran permukaan secara aktual dapat menyebabkan pengurangan drag. Hal ini diilustrasikan pada sebuah bola dalam Gambar 9.25. Seperti dibahas dalam Subbab 9.2.6, apabila bilangan Reynolds mencapai nilai kritis ($Re = 3 \times 10^5$ untuk bola licin), lapisan batas menjadi turbulen dan daerah olakan di belakang bola menjadi cukup menyempit daripada jika alirannya laminar (lihat Gambar 9.17). Hasilnya adalah suatu penurunan yang cukup besar dari drag tekanan dengan sedikit kenaikan dari drag gesekan, yang bila digabungkan memberikan drag (dan C_D) keseluruhan yang lebih kecil.

Lapisan batas dapat dibuat turbulen pada bilangan Reynolds yang lebih kecil dengan menggunakan bola yang permukaannya dikasarkan. Sebagai contoh bilangan Reynolds kritis untuk sebuah bola golf kira-kira $Re = 4 \times 10^4$. Dalam kisaran $4 \times 10^4 < Re < 4 \times 10^5$, drag pada bola golf dengan kekasaran standar jauh lebih sedikit ($C_{D \text{ kasar}}/C_{D \text{ halus}} \approx 0,25/0,5 = 0,5$) dibandingkan pada bola mulus. Seperti ditunjukkan dalam Contoh 9.12, ini adalah kisaran bilangan Reynolds yang tepat untuk bola-bola golf yang dapat dipukul dengan baik—jadi, itulah alasan adanya coak-coak pada bola golf. Kisaran bilangan Reynolds untuk bola tenis meja yang dapat dipukul dengan baik kurang dari $Re = 4 \times 10^4$. Jadi, permukaan bola tenis meja mulus.

CONTOH 9.12

Sebuah bola golf yang dapat dipukul dengan baik (diameter $D = 1,69$ in., berat, $\mathcal{W} = 0,0992$ lb) dapat melesat dengan kecepatan $U = 200$ ft/s ketika meninggalkan tee. Sebuah bola tenis meja yang dapat dipukul dengan baik (diameter $D = 1,50$ in., berat $\mathcal{W} = 0,00551$ lb) dapat bergerak dengan kecepatan $U = 60$ ft/s saat meninggalkan bat pemukul. Tentukan drag bola golf standar, bola golf mulus dan bola tenis meja untuk kondisi yang diberikan. Juga tentukan perlambatan setiap bola pada kondisi ini.

PENYELESAIAN

Untuk bola manapun, *drag* dapat diperoleh dari

$$\mathcal{D} = \frac{1}{2} \rho U^2 \frac{\pi}{4} D^2 C_D \quad (1)$$

di mana koefisien drag, C_D , diberikan dalam Gambar 9.25 sebagai fungsi dari bilangan Reynolds dan kekasaran permukaan. Untuk bola golf standar dalam udara standar

$$Re = \frac{UD}{\nu} = \frac{(200 \text{ ft/s})(1,69/12 \text{ ft})}{1,57 \times 10^{-4} \text{ ft}^2/\text{s}} = 1,79 \times 10^5$$

sementara untuk bola tenis meja

$$Re = \frac{UD}{\nu} = \frac{(60 \text{ ft/s})(1,50/12 \text{ ft})}{1,57 \times 10^{-4} \text{ ft}^2/\text{s}} = 4,78 \times 10^4$$

Koefisien *drag* yang berkaitan adalah $C_D = 0,25$ untuk bola golf standar dan $C_D = 0,51$ untuk bola golf mulus, dan $C_D = 0,50$ untuk bola tenis meja. Jadi dari Persamaan 1 untuk bola golf standar

$$\mathcal{D} = \frac{1}{2} (2,38 \times 10^{-3} \text{ slugs/ft}^3) (200 \text{ ft/s})^2 \frac{\pi}{4} \left(\frac{1,69}{12} \text{ ft} \right)^2 (0,25) = 0,185 \text{ lb} \quad (\text{Jawaban})$$

untuk bola golf mulus

$$\mathcal{D} = \frac{1}{2} (2,38 \times 10^{-3} \text{ slugs/ft}^3) (200 \text{ ft/s})^2 \frac{\pi}{4} \left(\frac{1,69}{12} \text{ ft} \right)^2 (0,51) = 0,378 \text{ lb} \quad (\text{Jawaban})$$

dan untuk bola tenis meja

$$\mathcal{D} = \frac{1}{2} (2,38 \times 10^{-3} \text{ slugs/ft}^3) (60 \text{ ft/s})^2 \frac{\pi}{4} \left(\frac{1,50}{12} \text{ ft} \right)^2 (0,50) = 0,263 \text{ lb} \quad (\text{Jawaban})$$

Perlambatan yang berkaitan adalah $a = \mathcal{D}/m = g\mathcal{D}/W$, di mana m adalah massa bola. Jadi perlambatan relatif terhadap percepatan gravitasi, a/g (bilangan dari perlambatan terhadap g) adalah $a/g = \mathcal{D}/W$ atau

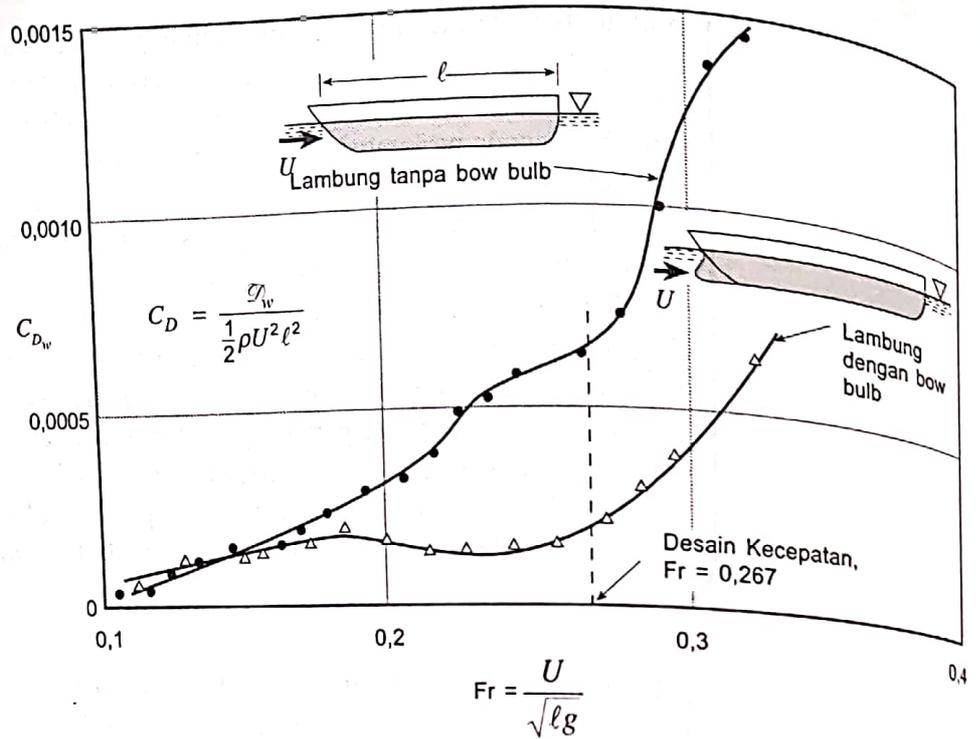
$$\frac{a}{g} = \frac{0,185 \text{ lb}}{0,0992 \text{ lb}} = 1,86 \text{ untuk bola golf standar} \quad (\text{Jawaban})$$

$$\frac{a}{g} = \frac{0,378 \text{ lb}}{0,0992 \text{ lb}} = 3,81 \text{ untuk bola golf licin} \quad (\text{Jawaban})$$

dan

$$\frac{a}{g} = \frac{0,0263 \text{ lb}}{0,00551 \text{ lb}} = 4,77 \text{ untuk bola tenis meja} \quad (\text{Jawaban})$$

Perhatikan bahwa terjadi perlambatan yang cukup kecil untuk bola golf kasar daripada bola golf mulus. Karena rasio drag terhadap massa lebih besar,



■ GAMBAR 9.26 Data koefisien drag yang khas sebagai fungsi dari bilangan Froude dan karakteristik lambung kapal untuk bagian drag yang disebabkan oleh timbulnya gelombang (diadaptasi dari Ref. 25).

ini benda *streamlined* (lambung tanpa *bulb*) memiliki *drag* yang lebih besar daripada yang tidak *streamlined*.

Drag Benda Komposit. Perkiraan perhitungan *drag* untuk benda kompleks seringkali dapat diperoleh dengan memperlakukan benda sebagai kumpulan dari berbagai bagiannya. Sebagai contoh, *drag* pada pesawat terbang dapat diperkirakan dengan menjumlahkan *drag* yang dihasilkan oleh berbagai komponennya—sayap, fuselage, bagian ekor, dan seterusnya. Perhatian penuh harus diberikan dalam menggunakan pendekatan seperti itu karena adanya interaksi antara berbagai bagian. Sebagai contoh, aliran yang melewati akar sayap (di dekat pertemuan antara sayap - fuselage) sangat berubah oleh adanya fuselage. Karena itu, bisa jadi tidak terlalu tepat dengan semata-mata menjumlahkan *drag* dari komponen-komponen untuk mendapatkan *drag* dari seluruh benda, meskipun pendekatan serupa itu seringkali cukup memadai.

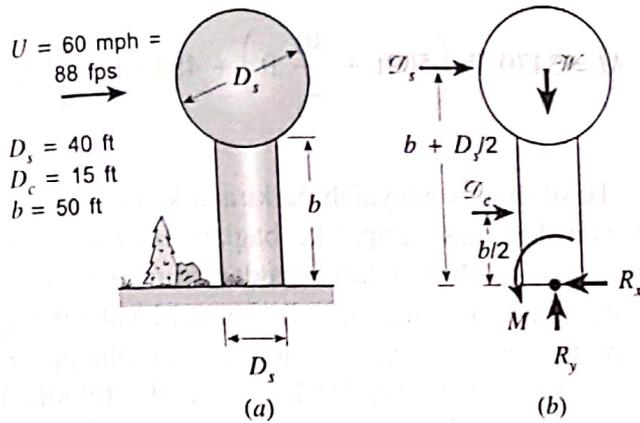
Drag pada benda yang kompleks dapat diperkirakan sebagai jumlah dari drag bagian-bagiannya.

CONTOH 9.13

Angin berkecepatan 60 mph (atau 88 fps) bertiup melewati sebuah menara air seperti yang ditunjukkan dalam Gambar C9.13a. Perkirakan momen (torsi), M , yang diperlukan pada dasar menara untuk menjaga agar menara tidak terjungkal.

PENYELESAIAN

Kita memperlakukan menara air sebagai sebuah bola yang ditopang sebuah silinder bundar serta mengasumsikan bahwa *drag* total adalah jumlah dari *drag* bagian-bagian ini. Diagram benda bebas dari menara ditunjukkan dalam



■ GAMBAR C9.13

Gambar C9.13b. Dengan menjumlahkan momen-momen terhadap dasar menara, kita memperoleh

$$M = F_s \left(b + \frac{D_s}{2} \right) + F_c \left(\frac{b}{2} \right) \quad (1)$$

di mana

$$F_s = \frac{1}{2} \rho U^2 \frac{\pi}{4} D_s^2 C_{Ds} \quad (2)$$

dan

$$F_c = \frac{1}{2} \rho U^2 b D_c C_{Dc} \quad (3)$$

masing-masing adalah *drag* pada bola dan silinder. Untuk kondisi atmosfer standar bilangannya Reynoldsnya adalah

$$Re_s = \frac{UD_s}{\nu} = \frac{(88 \text{ ft/s})(40 \text{ ft})}{1,57 \times 10^{-4} \text{ ft}^2/\text{s}} = 2,24 \times 10^7$$

dan

$$Re_c = \frac{UD_c}{\nu} = \frac{(88 \text{ ft/s})(15 \text{ ft})}{1,57 \times 10^{-4} \text{ ft}^2/\text{s}} = 8,41 \times 10^6$$

Koefisien *drag* yang bersesuaian, C_{Ds} dan C_{Dc} , dapat diperkirakan dari Gambar 9.21 sebagai

$$C_{Ds} \approx 0,3 \quad \text{dan} \quad C_{Dc} \approx 0,7$$

Perhatikan bahwa nilai dari C_{Ds} diperoleh dengan ekstrapolasi dari data yang diberikan terhadap bilangan Reynolds di luar dari yang diberikan (hal yang sebenarnya berpotensi berbahaya jika tidak dilakukan dengan hati-hati!). Dari Persamaan 2 dan 3 kita memperoleh

$$F_s = 0,5(2,38 \times 10^{-3} \text{ slugs/ft}^3)(88 \text{ ft/s})^2 \frac{\pi}{4} (40 \text{ ft})^2(0,3) = 3470 \text{ lb}$$

dan

$$F_c = 0,5(2,38 \times 10^{-3} \text{ slugs/ft}^3)(88 \text{ ft/s})^2(50 \times 15 \text{ ft})(0,7) = 4840 \text{ lb}$$

Dari Persamaan 1, momen terkait yang dibutuhkan untuk mencegah menara terjungkal adalah

$$M = 3470 \text{ lb} \left(50 \text{ ft} + \frac{40}{2} \text{ ft} \right) + 4840 \text{ lb} \left(\frac{50}{2} \text{ ft} \right) = 3,64 \times 10^5 \text{ ft} \cdot \text{lb}$$

(Jawaban)

Hasil di atas hanyalah perkiraan karena (a) tiupan angin mungkin tidak seragam dari atas sampai ke bagian dasar menara, (b) menara tidak tepat merupakan kombinasi dari bola dan silinder bundar yang mulus, (c) panjang silinder tidak tak terhingga, (d) akan terdapat beberapa interaksi antara aliran melewati silinder dan yang melewati bola sehingga *drag* netto tidaklah benar-benar merupakan jumlah dari keduanya, dan (e) nilai koefisien *drag* diperoleh dengan ekstrapolasi dari data yang diberikan. Namun demikian, hasil pendekatan seperti itu seringkali cukup akurat.

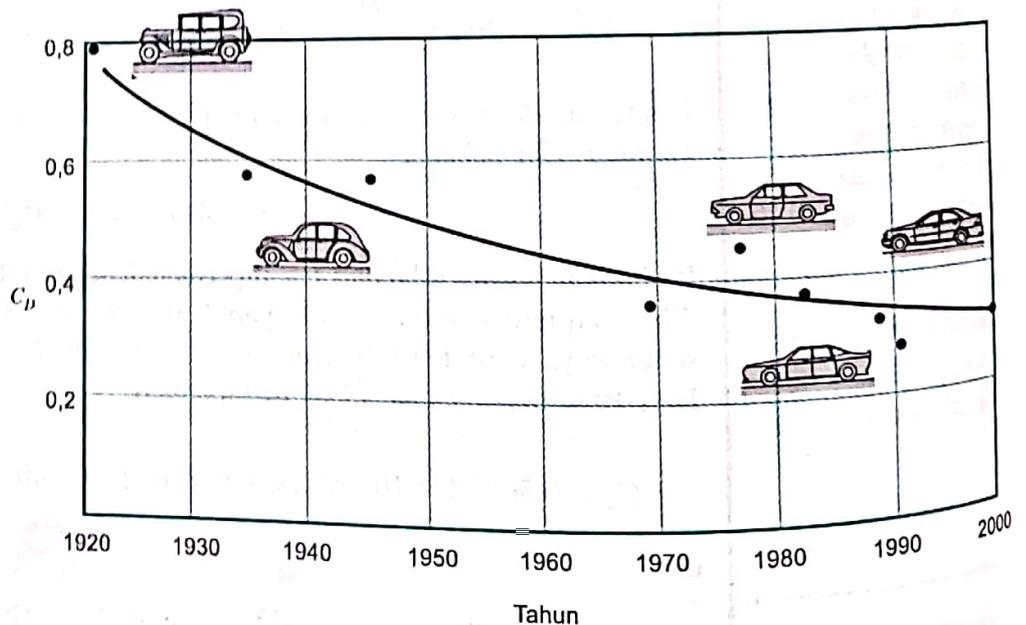


V9.8 Drag pada sebuah truk

Banyak upaya telah dilakukan untuk mengurangi drag aerodinamika pada mobil.

Drag aerodinamika pada mobil sering menjadi contoh suatu benda komposit. Daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan sebuah mobil sepanjang jalan digunakan untuk mengatasi hambatan gelinding dan *drag* aerodinamika. Untuk kecepatan di atas kira-kira 30 mph, *drag* aerodinamika memberikan kontribusi yang penting terhadap gaya propulsif netto yang dibutuhkan. Kontribusi *drag* karena berbagai bagian dari mobil (bagian depan, kaca depan, atap, bagian belakang, dan lain-lain) telah ditentukan dengan berbagai model dan pengujian ukuran penuh dan juga perhitungan numerik. Kini kita dapat memperkirakan *drag* aerodinamika pada mobil dengan berbagai jenis bentuk.

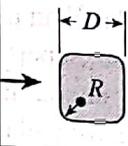
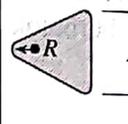
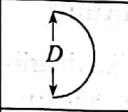
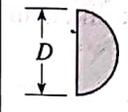
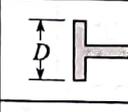
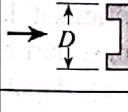
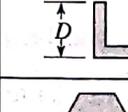
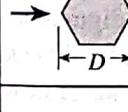
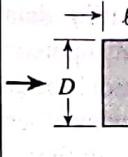
Seperti ditunjukkan dalam Gambar 9.27, koefisien *drag* untuk mobil telah semakin berkurang secara terus menerus dari tahun ke tahun. Pengurangan ini merupakan hasil dari perancangan yang sungguh-sungguh pada bentuk dan perincian (seperti cetakan jendela, kaca spion, dan lain-lain). Pengurangan *drag* tambahan telah dilakukan dengan suatu pengurangan



■ GAMBAR 9.27 Kecenderungan dari streamlining kendaraan untuk mengurangi drag aerodinamiknya dan meningkatkan efisiensi pemakaian bahan bakar mil per galonnya (diadaptasi dari Ref. 5).

luas proyeksi. Hasil nettoanya adalah peningkatan yang besar dari efisiensi bahan bakar, terutama sewaktu kendaraan berjalan dengan kecepatan tinggi. Informasi tambahan yang banyak mengenai aerodinamika kendaraan darat dapat dijumpai dalam literatur (Ref. 30).

Efek dari beberapa parameter yang penting (bentuk, Re , Ma , Fr dan kekasaran) terhadap koefisien *drag* untuk berbagai benda telah dibahas dalam Subbab ini. Seperti telah dinyatakan sebelumnya, informasi mengenai koefisien *drag* untuk berbagai jenis benda telah tersedia dalam literatur. Beberapa informasi ini diberikan dalam Gambar 9.28, 9.29 dan 9.30 untuk berbagai benda-benda dua dan tiga-dimensi yang alamiah maupun buatan manusia.

| Bentuk | Daerah referensi A ($b = \text{panjang}$) | Koefisien drag $C_L = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$ | Bilangan Reynolds $Re = \rho U D / \mu$ |
|---|---|---|--|
|  Batang segiempat dengan sudut dibulatkan | $A = bD$ | R/D C_D 0 2,2 0,02 2,0 0,17 1,2 0,33 1,0 | $Re = 10^5$ |
|  Segitiga sama sisi dengan sudut dibulatkan | $A = bD$ | R/D C_D 0 1,4 2,1 0,02 1,2 2,0 0,08 1,3 1,9 0,25 1,1 1,3 | $Re = 10^5$ |
|  Kerang setengah lingkaran | $A = bD$ | \rightarrow 2,3 \leftarrow 1,1 | $Re = 2 \times 10^4$ |
|  Silinder setengah lingkaran | $A = bD$ | \rightarrow 2,15 \leftarrow 1,15 | $Re > 10^4$ |
|  Balok-T | $A = bD$ | \rightarrow 1,80 \leftarrow 1,65 | $Re > 10^4$ |
|  Balok-I | $A = bD$ | 2,05 | $Re > 10^4$ |
|  Siku | $A = bD$ | \rightarrow 1,98 \leftarrow 1,82 | $Re > 10^4$ |
|  Heksagonal | $A = bD$ | 1,0 | $Re > 10^4$ |
|  Persegi panjang | $A = bD$ | l/D C_D $\leq 0,1$ 1,9 0,5 2,5 0,65 2,9 1,0 2,2 2,0 1,6 3,0 1,3 | $Re = 10^5$ |

■ GAMBAR 9.28 Beberapa koefisien drag untuk benda-benda dua dimensi beraturan (Ref. 5 dan 6).